三江源地区草原森林基于空间网格的雷电危险性评估

谢 捷[1]， 代青措[1]， 马玉芳[1]， 孙芙荣[1]， 李梓瑄[1]， 李乾英[2]
（1. 青海气象服务中心，青海 西宁 810001；2. 96742部队气象台，青海 大通 810100）

摘 要：以三江源地区2021—2022年闪电定位资料以及1984—2022年雷电灾害数据，计算出地闪密度、地闪强度和雷电灾害密度，采用层次分析法以及ArcGIS空间网格法分析技术对三江源地区雷电灾害的危险性进行评估，并结合三江源地区草原森林分布，分别计算出草原和森林雷电危险性分布。结果表明：(1) 三江源地区雷电灾害6月伤亡最严重，多集中在12:00—20:00之间，16:00受灾人最多，17:00雷击死亡人最多，玉树州囊谦县、杂多县、玉树市，果洛州甘德县伤亡占比高。(2) 三江源地闪密度高值集中在果洛州和玉树州南部地区；地闪强度高值集中在果洛州东部、南部和玉树州南部地区；雷电灾害密度高值集中在果洛中东部和玉树中南部地区；雷电灾害危险性高值区分布在玉树州囊谦县着晓乡、毛庄乡、东坝乡、娘拉乡、吉尼赛乡和玉树市下拉秀镇，果洛州班玛县、久治县、哇尔依乡和玛沁拉加镇。(3) 草原雷电危险性高值区主要集中在玉树州西部和南部、果洛州南部和中东部。森林危险性高值区集中在玉树州东南部、果洛州南部和东北部。(4) 三江源地区玉树州、果洛州草原森林雷电灾害与海拔高度呈负相关，与地形起伏度和地形坡度呈正相关。通过对三江源地区玉树州和果洛州草原森林雷电灾害危险性分析评估，为雷电灾害预防提供有利依据。

关 键 词：三江源地区；玉树州和果洛州；草原森林；雷电；危险性
文章编号：1000－6060(2024)10－1713－11(1713～1723)

雷电是在特定大气环境中发展起来的强对流现象，也是自然界中破坏力很强瞬间放电现象，可造成森林草场火灾等破坏或造成供电和通讯系统损坏或故障，威胁计算机网络或重要且敏感的高科技装备，被联合国和国际电工委员会分别列为“最严重的10种自然灾害之一”[1-2]和“电子化时代的一大公害”[3-4]。雷电灾害是强烈的雷电天气，其发生频率虽然不高，但相当比例的雷灾是由雷电天气产生的，强位势不稳定和强垂直切变是这类天气最重要的气象环境特征之一。雷电作为十大自然灾害之一，雷电灾害的危险程度仅次于气象地质灾害和暴雨洪涝灾害，因此对雷电时空分布的研究尤为重要[5]。

近年来，针对雷电灾害的时空分布特征，国内学者开展了大量的研究。刘兆旭等[1]利用闪电定位数据对新疆雷电灾害进行了分析；王秀英等[2]用模糊隶属度方法评定青海西宁的雷电危险度；高燚等[3]用聚类分析法对海南岛雷电灾害易损度进行风险区划；徐金霞等[4]采用数理统计方法以及ArcGIS空间分析技术对四川泸州地区长江河谷地带雷电活动规律及其危险性进行了分析评价；李霞等[5]采用层次分析法，利用绍兴市闪电定位数据、地理信息数据、人口及经济数据建立雷电灾害评价指标与风险评估的定量关系；龙爽等[6]利用闪电定位网观测数据、灾害数据、乡村用电数据，采用矩阵方法对河北省乡村进行雷灾风险区划研究；陈家宏等[7]提出了适用于闪电定位数据的雷电参数统计方法；张烨方等[8]提出基于地理信息技术的网格化雷电灾害风险评估模型；陈柳彤等[9]用闪电定位数据地理信息数据和社会经济数据对河北雷电灾害进行了风

收稿日期：2024-03-26； **修订日期**：2024-06-05
基金项目：青海省科技计划应用基础研究项目(2023-ZJ-714)；青海省气象局重点项目(QXZD2023-04)资助
作者简介：谢捷(1986-)，女，工程师，硕士，主要从事气象专业服务与防灾减灾等方面的研究. E-mail: xiejienotebook@163.com
通讯作者：代青措(1982-)，女，高级工程师，本科，主要从事气象服务研究. E-mail: daiqcuo@163.com

险区划；田德宝等[10]对全国雷电灾害事故进行了统计分析；刘晓东等[11]对内蒙古雷电活动及灾害进行了分析；邓德文等[12]对四川、山东、黑龙江3个中国典型省的雷电活动气候特征和机制进行了分析。目前，关于青藏高原的雷电灾害特征研究，主要集中西藏。如周筠珺[13]、许永彬等[14]利用地面观测数据，多吉次仁等[15]利用雷电灾害的实况分布及灾害特征，研究表明高原雷暴日主要在5—9月，呈现单峰分布，且具有发生频率高、范围广、雷暴活动时间长的特征，因雷击造成人员或牲畜伤亡、家用电器和房屋损毁等均集中发生在农牧区，城镇相对较少。而赵阳等[16]研究表明，青藏高原那曲地区的地闪发生频率显著偏少，低于全国平均水平。以上研究表明，青藏高原不同区域的地闪频率存在显著差异，可能是因为雷电灾害的频繁程度并不完全取决于雷电活动分布，同时，也受到人口密度和经济发展状况等因素的影响。目前关于青海省特别是地处青藏高原腹地的三江源地区雷电灾害特征尚不清楚，因此有必要开展青海省尤其是三江源地区雷电灾害时空分布及其灾害特征分析的研究。在全球气候变暖的背景下，随着青藏高原"暖湿化"的气候变化，极端气候事件频发，所导致的经济损失也愈发严重[17]。在此背景下，本研究基于青海省三江源地区闪电定位数据以及雷电灾害资料，详细分析三江源地区玉树州和果洛州森林草原地区雷电灾害活动的时空分布特征，结合闪电定位数据计算出地闪密度和地闪强度分布特征，通过空间网格法和层次分析法对三江源地区草原和森林雷电灾害的危险性进行评估，为高海拔地区农牧业生产的雷电灾害防御提供参考依据。

1 研究区概况

三江源地处青藏高原西南部，属于大陆性高原气候，高原季风特征非常明显，大部分地区降水稀少，为干旱、半干旱地区。冬季在蒙古冷高压控制下寒冷，3月随着南支季风的北抬，高原季风开始爆发并持续加强，7—8月达强盛期。由于高原夏季的强烈加热作用，四周空气向高原辐合上升，导致高原地区空气的不稳定，为中小尺度热对流的发展提供了条件。加上高原极度起伏的地表，有利于局部气候的形成。有研究表明，当对流层上部受青藏高压控制时，500 hPa伊朗高压和太平洋高压远离高原，将引起高原上切变线和低涡天气系统盛行，致使青藏高原成为我国对流最为旺盛的地区之一，常有阵性降水、雷电和冰雹等灾害性天气发生。

玉树藏族自治州位于青海省西南部，地理位置介于89°27′~97°39′E、31°45′~36°10′N之间，平均海拔在4696 m；果洛藏族自治州位于青海省东南部，位于97°54′~101°50′E，32°31′~35°40′N，平均海拔在4200 m以上，玉树州和果洛州均属于"三江源"自然保护区范围内，生态地位非常重要，两州均以畜牧业为支柱产业，是"牦牛之都"的主区域（图1a）。

2 数据与方法

2.1 数据来源

三江源地区玉树州、果洛州2021—2022年闪电定位数据资料、1984—2022年的雷电灾害数据均来自青海省气象信息中心，三江源地区草原分布数据和森林分布数据来自青海气象科研所提供，根据闪电数据计算出地闪密度、地闪强度和灾害密度，根据中小尺度天气系统范围将用空间网格分析法将区域划分为25 km×25 km的网格进行显示[7-8]（图1b）。模型流程图具体如图2所示。其中地闪密度H_2指单位网格面积单位时间的平均地闪次数，利用地闪数据计算出区域空间范围内年均地闪次数，并除以相应地区网格面积（图1b），得到单位网格的地闪密度，地闪密度能够很好地反映研究网格区域的雷击概率，地闪密度大值区域对应着雷电活动的高发。地闪强度是根据百分位数法（表1）划分雷电流幅值不同等级后，再进行加权平均（公式1）得到的强度，可以表明地区遭受雷电灾害概率的大小[7]，公式如下：

$$H_3 = \sum_{i=1}^{s} \frac{i}{15} \times F_i \tag{1}$$

式中：H_3为地闪强度；i为雷电流幅值的等级；F_i为i等级雷电流幅值地闪频次的归一化值。

2.2 研究方法

2.2.1 评估模型 将地闪密度、地闪强度和灾害密度作为雷电灾害危险性指标，并对各指标进行归一化处理消除量纲差异，采用加权综合评价法计算雷电灾害危险性指数H[18]，计算公式如下：

$$H(x) = \sum_{j}^{i} \left[W_j \times H_{ji}(x) \right] \tag{2}$$

式中：$H(x)$为雷电灾害危险性指数，通过对雷电灾

(a) 地形海拔高度

图例

乡镇界

海拔/m

6818

1918

0　160 km

(b) 区域网格划分图

图例

网格线

网格点

乡镇界

网格面

0　160 km

注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2017)3320号的标准地图制作，底图边界无修改。下同。

图1　三江源地区地形图

Fig. 1　Topographic map of the “Three River Source” region

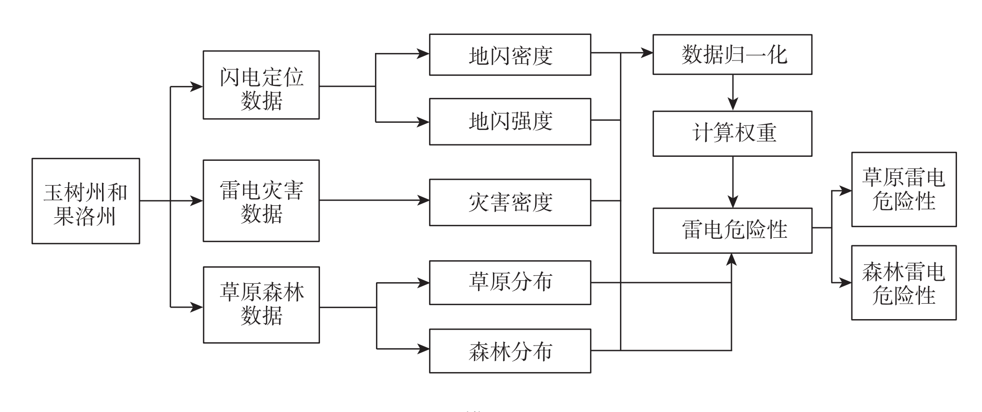


图2　模型流程图

Fig. 2　Model flow chart

表1　雷电流幅值划分等级

Tab. 1　Classification level of lightning current amplitude

等级	1	2	3	4	5
百分位数区间/%	$P\leqslant60$	$60<P\leqslant80$	$80<P\leqslant90$	$90<P\leqslant95$	$95<P$

注：P为雷电流幅值百分位数。

害危险性指标进行加权求和得到；W_j为各危险性指标所对应的权重系数；$H_{ji}(x)$为雷电灾害危险性指标，分别是地闪密度、地闪强度和灾害密度。

2.2.2　指标数据的归一化处理　通过对各指标层进行空间相关分析，确定用正向极差法来进行标准化处理，对不同量纲的数据进行归一化处理，来消除量纲影响[19]，计算公式如下：

$$Y_{ij}=\frac{X_{ij}-\min X_{ij}}{\max X_{ij}-\min X_{ij}} \tag{3}$$

式中：Y_{ij}为j格点第i个指标的归一化值；X_{ij}为j格点第i个指标值；min、max分别为第i个指标值的最小值和最大值。

2.3　确定指标权重

用层次分析法确定危险性指标权重（表2），建立递阶层次结构，根据1~9标度方法构造判断矩阵，确定各指标权重[5]（表3）。

表2　层次分析法确定主观权重步骤

Tab. 2　Determination of subjective weight by analytic hierarchy process

步骤	具体内容
建立递阶层次结构	构造雷电灾害危险性目标层级，具体如图1所示，利用闪电数据、雷电灾害数据和森林草原数据，构建影响因子指标，从而确定雷电灾害危险性评价指标体系。
比较构造判别矩阵（A）	采用1~9标度方法，对各层指标的两两元素进行相对重要性程度进行量化，构造两者比较判断矩阵A。
权重计算（W）	比较判断矩阵A的特征根问题$AW=\lambda_{\max}W$的解，经过归一化后为统一层次相应因子的重要性权重值。
一致性检验	一致性指标$\mathrm{CI}=\frac{\lambda_{\max}-n}{n-1}$，当平均随机性RI指标比率$\mathrm{CR}=\frac{\mathrm{CI}}{\mathrm{RI}}$小于0.1时，则判断矩阵$A$的一致性为合理；若$\mathrm{CR}\geqslant0.1$时，则说明判断矩阵$A$不合理，需要重新进行检验。

表3　三江源地区各指标的空间相关性及其权重

Tab. 3　Spatial correlation and weights of various indicators in "Three River Source" region

空间相关性	灾害密度	地闪密度	地闪强度	权重
灾害密度	1.000	0.144	0.281	0.114
地闪密度	0.144	1.000	0.497	0.405
地闪强度	0.281	0.497	1.000	0.481

3　结果与分析

3.1　三江源地区雷电灾害的地区与时间分布特征

对1984—2022年三江源地区雷电灾害数据进行统计，按照市县雷电灾害人口影响统计发现（图3a），三江源玉树州囊谦县、杂多县和玉树市受灾与死亡人数占比均很高，受灾人数占比超23%，杂多县和玉树市死亡人数占比超25%，囊谦县死亡人数占比超15%；三江源果洛州甘德县死伤人数占比较高，受灾人数占比为6.7%，死亡人数占比为9.0%。三江源地区雷电灾害在2017年后有明显增加（图3b），同时受灾人口和死亡人数也明显增加，仅2022年雷击伤亡人数达32人，死亡占了一半。三江源地区雷电灾害主要出现在5—9月，其中6月最多，占比超47%；对应灾害影响人口也集中在5—9月（图3c），尤其6月伤亡最严重，占总死亡人数的50%，5月和7月为伤亡次严重月死亡人数占比达20%。三江源果洛州雷电灾害呈双峰变化，分别为6月和8月，灾害发生占比超27%；三江源玉树州雷电灾害主要集中在6月，占比超54%。三江源地区雷电灾害发生的时间主要集中在12:00—20:00（图3d），并呈双峰式变化，最高时间按段集中在16:00和19:00之间，其中16:00时出现占比超过23%；三江源玉树州雷电灾害发生高峰时间分别集中在16:00、17:00和19:00，16:00和17:00灾害发生占比超过19%；三江源果洛州雷电灾害发生高峰时间分别集中在16:00和19:00，16:00灾害发生占比超过36%。

3.2　三江源地区雷电灾害发生时间和伤亡的空间分布

三江源地区草原、森林资源丰富，分布广泛，畜牧业为主导产业。对1984—2022年三江源地区雷电灾害进行空间统计分析（图4），可以看出不同地区雷电灾害发生时间的空间分布。三江源玉树州雷电灾害主要集中在其东南部，集中时间在5—7

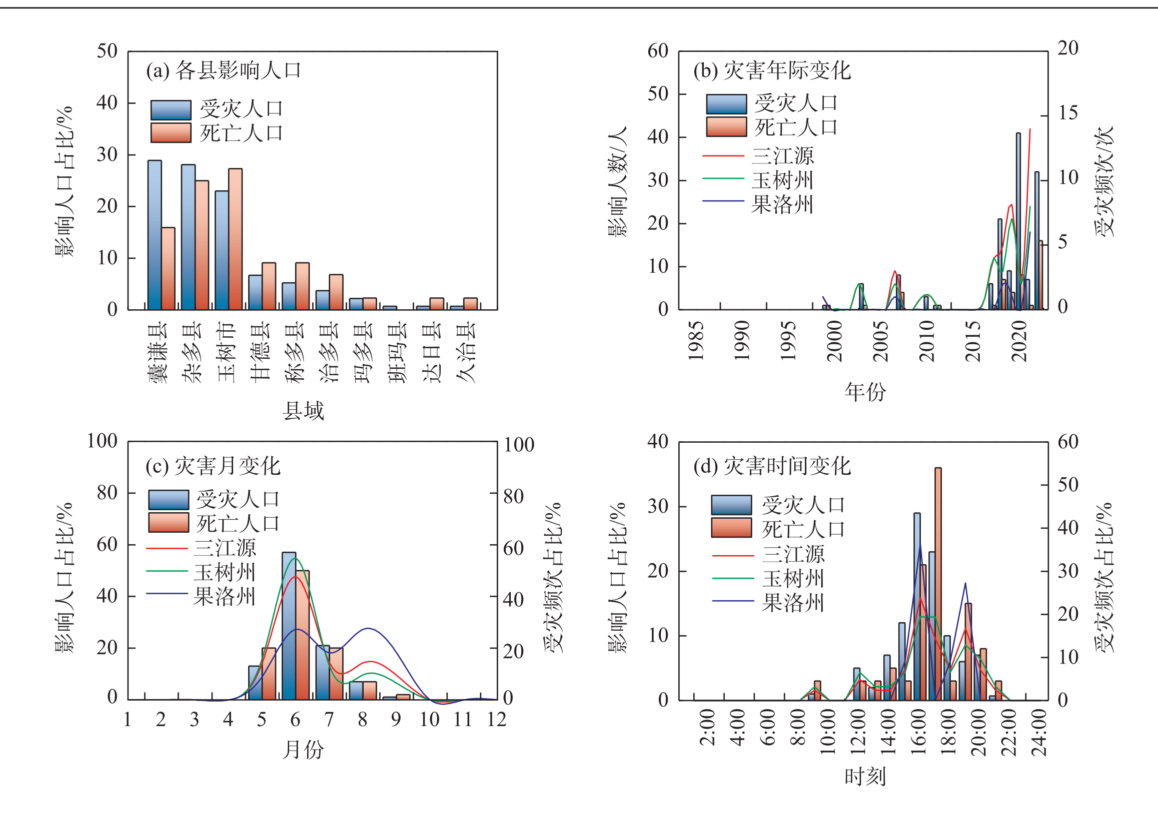


图3　三江源地区雷电灾害统计

Fig. 3　Statistics of lightning disasters in “Three River Source” region

月，占比超83%；果洛州雷电灾害主要集中在中东部，集中时间在6—9月，占比超90%(图4a)。三江源地区雷电灾害发生时间主要集中在下午和傍晚时分(图4b)，玉树州雷电灾害下午14:00—18:00占比超54%，傍晚19:00—21:00占比超25%；果洛州雷电灾害下午15:00—18:00占比超54%，傍晚19:00占比超27%；三江源地区雷电灾害人口受灾伤亡较大的是玉树州囊谦县、玉树市和杂多县(图4b)，其中玉树市和杂多县的伤亡占比超过了25%，囊谦县的伤亡占比超过了15%。因此迫切需要对该地区雷电灾害的危险性进行评估，来提高当地农牧业生产雷电防御能力，减少相应伤亡事故的发生。

3.3　雷电灾害的空间分布

3.3.1　地闪密度　地闪密度是单位网格上的年平均地闪次数，反映雷电放电的频繁度。在雷电灾害防护水平较低地区，高频率雷电活动对应的伤亡事故很高[20]。三江源地区地闪密度分布(图5a)，高值区主要集中在果洛州大部和玉树州南部地区，其中果洛州班玛县灯塔乡、马可河乡、知钦乡、亚尔堂乡、赛来塘镇、吉卡乡和玛沁县拉加镇单位网格每年地闪密度超过3000次，尤其玛沁县拉加镇单位网格每年地闪密度高达3847次；玉树市的下拉秀镇和囊谦县娘拉乡、吉曲乡、毛庄乡，以及果洛州班玛县的多贡麻乡、江日堂乡和甘德县的江千乡、达日县的特合土乡单位网格每年地闪密度超过2500次。

3.3.2　地闪强度　地闪强度反映雷电的电流强度，表征地区遭受雷电灾害的概率大小，是雷电灾害危险性评估中的重要因子[4-5]。利用百分位数法将雷电流幅值进行分级(表1)后，得到雷电流幅值不同强度等级的地闪频次归一化值，再加权平均(公式1)得到的强度值。玉树州、果洛州地闪强度分布(图5b)，高值区主要集中在果洛州东部与南部和玉树州南部地区，其中果洛州班玛县马可河乡、吉卡乡、赛来塘镇、知钦乡、亚尔堂乡、灯塔乡和玛沁县的拉加镇平均地闪强度大于0.35，尤其班玛县的马可河乡和玛沁县的拉加镇平均地闪强度高达0.40；玉树州囊谦县的吉尼赛乡、着晓乡、东坝乡、毛庄乡和杂多县的阿多乡、莫云乡，以及果洛州班玛县的达卡乡、达日县的建设乡、吉迈镇、下红科乡、满掌乡、窝赛乡、特合土乡，久治县的哇尔依乡、索乎日麻乡、智青松多镇、哇赛乡和玛沁县的东倾沟乡平均地闪强度大于0.33。

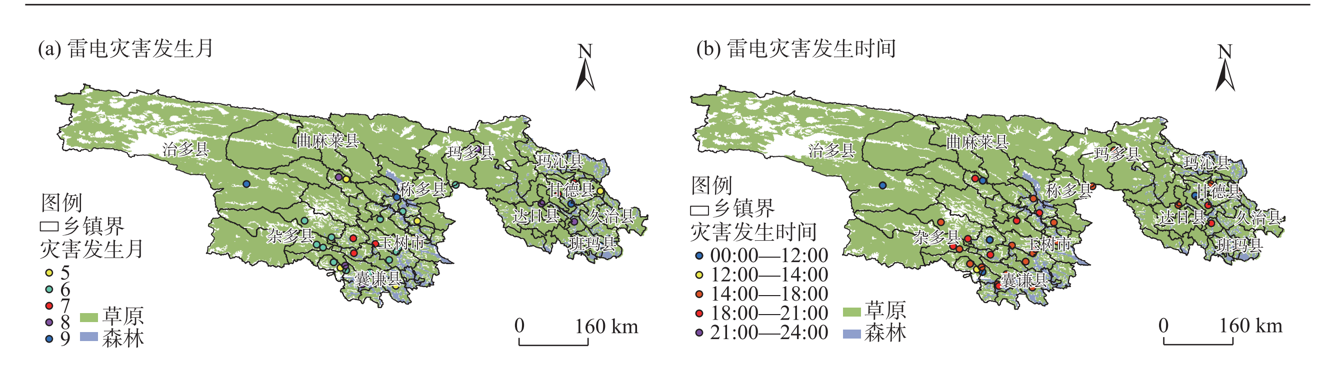


图4 三江源地区雷电灾害发生时间

Fig. 4 Time of lightning disaster occurrence in “Three River Source” region

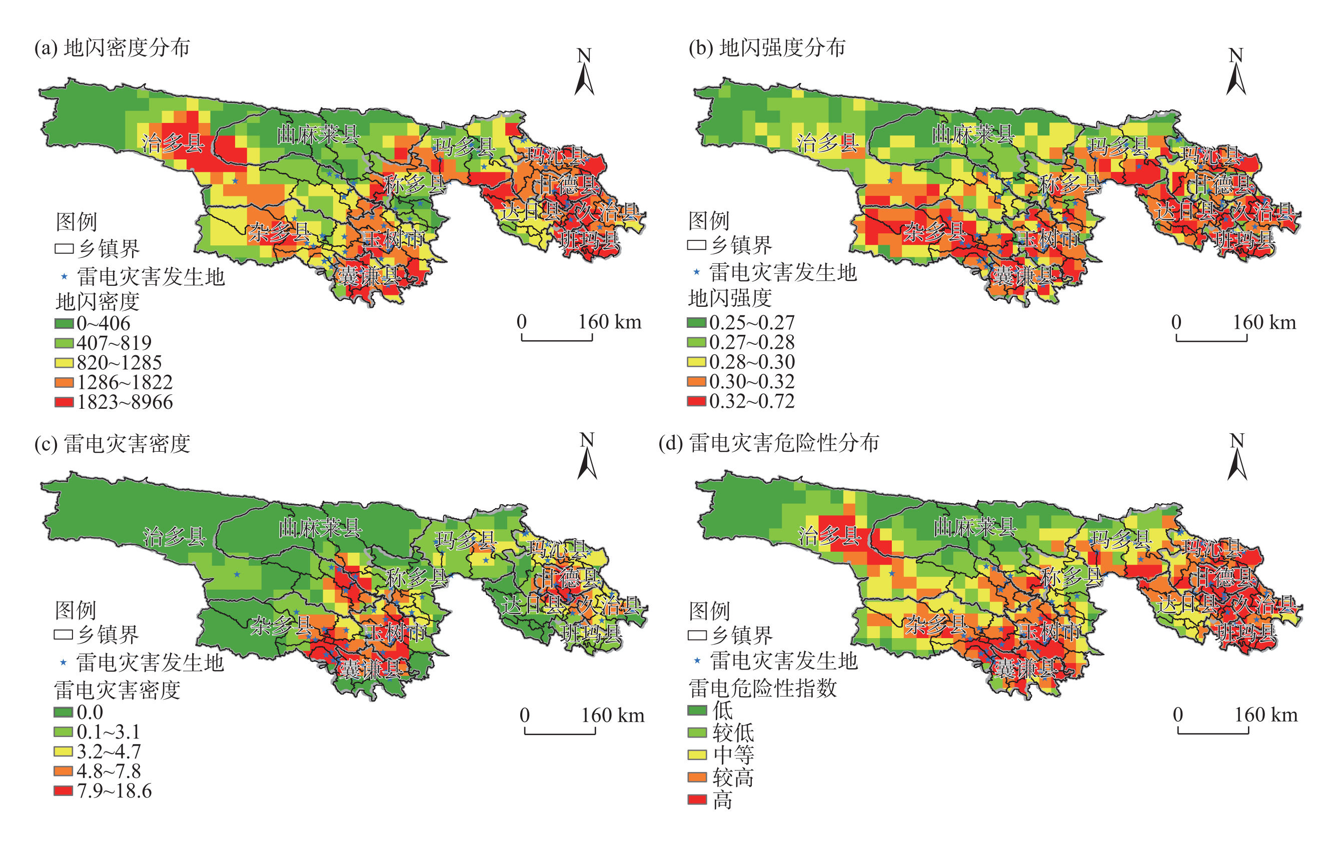


图5 三江源地区雷电灾害分布

Fig. 5 Distribution of lightning disasters in “Three River Source” region

3.3.3 灾害密度 三江源地区雷电灾害密度分布(图5c),果洛州、玉树州在1984—2022年间平均雷电灾害密度高值主要集中在果洛州中东部和玉树中南部地区,其中玉树州囊谦县的东坝乡、着晓乡、香达镇、觉拉乡,玉树市的下拉秀镇,杂多县的苏鲁乡、昂赛乡、结多乡,治多县的治渠乡,以及果洛州甘德县的下贡麻乡、柯曲镇、青珍乡和达日县的吉迈镇单位网格雷电灾害密度在8次以上,尤其玉树州囊谦县的东坝乡、着晓乡,杂多县的苏鲁乡和果洛州达日县的吉迈镇单位网格雷电灾害密度为10次以上。

3.3.4 危险性 雷电灾害危险性评估,指数越大,危险性越高,雷电灾害危险性指数等级分级如表4。三江源地区雷电灾害危险性分布(图5d),雷电灾害危险性评估高值主要集中在果洛州班玛县的马可河乡、赛来塘镇、知钦乡、灯塔乡、吉卡乡、亚尔堂乡、多贡麻乡、江日堂乡,甘德县的下贡麻乡和江千乡,久治县的哇尔依乡和玛沁县的拉加镇,以及玉树州囊谦县的着晓乡、毛庄乡、东坝乡、娘拉乡、吉尼赛乡和玉树市的下拉秀镇,其危险性指数在0.3以上,其中果洛州班玛县的马可河乡、赛来塘镇和

表4　雷电灾害危险性指数等级分级

Tab. 4　Classification of lightning disaster risk index levels

雷电灾害	等级划分	分位分级法
危险性指数	低	[0.12, 0.15)
	较低	[0.15, 0.19)
	中等	[0.19, 0.22)
	较高	[0.22, 0.26)
	高	[0.26, 0.66]

知钦乡的危险性指数在0.35以上，玛沁县的拉加镇的危险性指数达0.41。

3.3.5　草原和森林雷电危险性分布　根据三江源地区草原森林分布分别计算出草原雷电危险性分布和森林雷电危险性分布(图6)。三江源地区草原雷电危险性分布(图6a)与草原雷电危险性均值分区统计(图6c)，草原危险性指数高值区主要集中在三江源玉树州西部和南部，果洛州南部和中东部。玉树州草原雷电危险性指数最大值位于治多县索加乡达0.57，其次是着晓乡、东坝乡和吉尼赛乡，最大值均大于0.35；果洛州草原雷电危险性指数大值区主要集中在班玛县、达日县和玛沁县，其中最大值位于玛沁县拉加镇达0.66，其他均在0.35~0.38之间。通过对三江源地区草原雷电危险性指数均值分区统计，玉树州草原雷电危险性指数均值大于0.3的地区主要集中在囊谦县，乡镇分别为娘拉乡、吉尼赛乡、毛庄乡、东坝乡和着晓乡；果洛州草原大于0.3雷电危险性指数主要集中在班玛县、甘德县下贡麻乡和江千乡、久治哇尔依乡和玛沁县拉加镇，其中均值最大值位于玛沁县拉加镇为0.39，尤其班玛县全境草原的雷电危险性均值在0.30~0.36之间，班玛县的知钦乡、赛来塘镇和马可河乡草原雷电危险性均值大于0.35。

三江源地区森林地区雷电危险性分布(图6b)与森林地区雷电危险性均值分区统计图(图6d)，森林危险性指数高值区与森林的分布基本一致，尤其与几大林场位置相对应，如三江源地区玉树州囊谦县的白扎林场、玉树市江西林场、果洛州班玛县的玛可河林场、玛沁的洋玉林场。玉树州森林雷电危险性指数最大值位于囊谦县的着晓乡为0.36，其次是东坝乡和吉尼赛乡，最大值均大于0.35；果洛州森林雷电危险性指数最大值位于玛沁县拉加镇达0.66，其次是班玛的灯塔乡、赛来塘镇、吉卡乡、马可河乡和多贡麻乡均在0.37~0.38之间。通过对三江源地区森林雷电危险性指数均值分区统计，玉树州森林雷电危险性指数均值大于0.3的地区主要集中在囊谦县的娘拉乡、毛庄乡、东坝乡和着晓乡、玉树

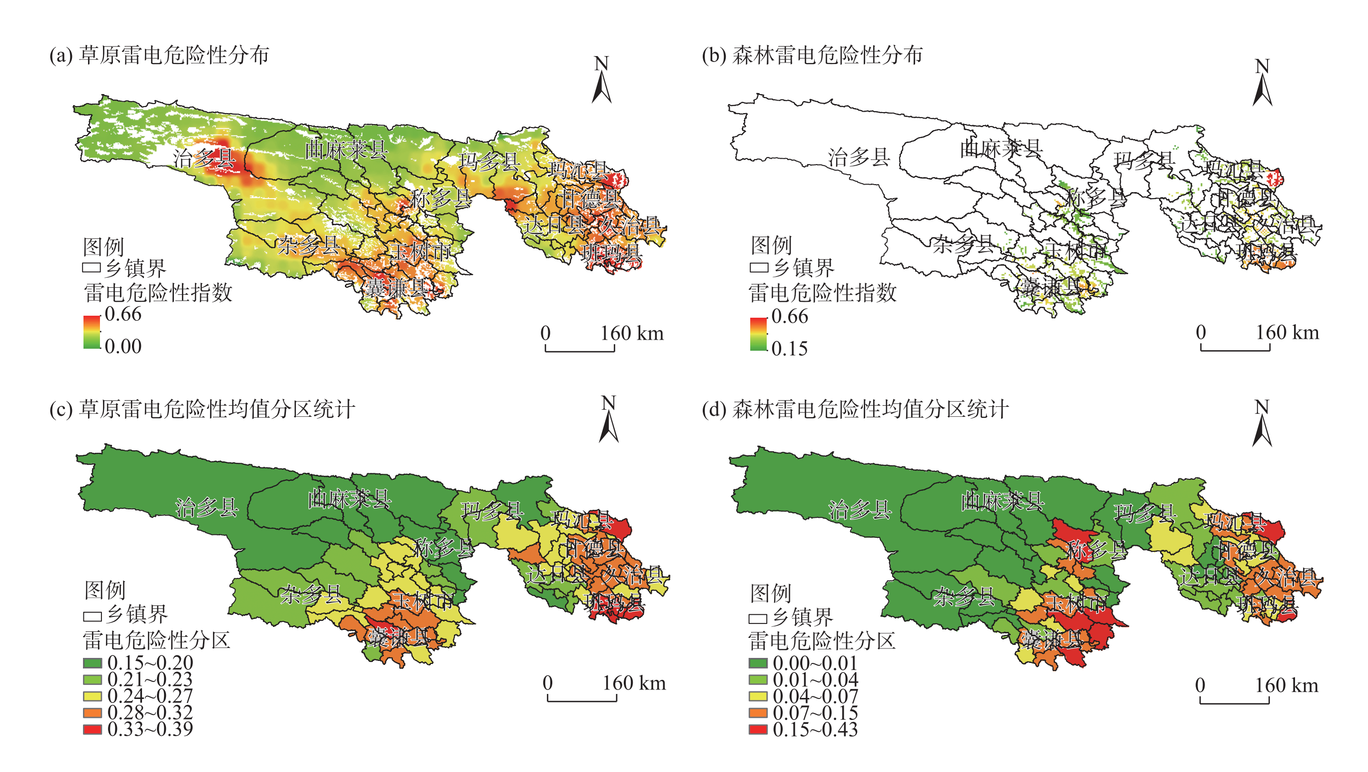


图6　三江源地区草原、森林雷电危险性分布

Fig. 6　Distribution of lightning hazards in grasslands and forests in “Three River Source” region

市的下拉秀镇和曲麻莱县的约改镇，数值在0.30~0.31之间；果洛州森林大于0.3雷电危险性指数主要集中在班玛县、达日县德昂乡、甘德县下贡麻乡、岗龙乡和江千乡、久治县哇尔依乡和玛沁县拉加镇，其中森林雷电危险性均值最大值位于玛沁县拉加镇为0.43，其次班玛县知钦乡、灯塔乡和马可河乡森林雷电危险性均值均大于0.35。

3.4 雷电灾害危险性与地理位置的关系

三江源地区雷电灾害主要集中在南部地区，为了解雷电发生与地形的关系，对雷电灾害相关的历史灾害密度、地闪密度、地闪强度、雷电危险性、草原和森林雷电危险性与当地的海拔高度、地形起伏度、地形坡度地理因子进行相关分析(表5)，可以看出雷电灾害密度、地闪密度、地闪强度、雷电危险性、草原和森林雷电危险性与海拔高度呈负相关，与地形起伏度和地形坡度呈正相关。除森林雷电危险性与地理因子相关性没达到显著，历史灾害密度与海拔高度相关性没达到显著，地闪密度、地闪强度、雷电危险性、草原雷电危险性与地形因子呈显著相关，甚至通过0.01的极显著相关。三江源草原地区雷电危险性与海拔高度相关性为-0.623(通过0.01的显著性检验)，与地形起伏度相关性为0.487(通过0.01的显著性检验)，与地形坡度相关性为0.429(通过0.01的显著性检验)，说明三江源草原地区雷电危险性高值区对应的地形起伏度和坡度大值区；由于三江源玉树州、果洛州平均海拔高度已超过4000 m，因此海拔高度再高反而抑制对流雷电的产生，因此呈极著性的负相关。加之三江源玉树州、果洛州南部地区在夏季盛行西南季风，温暖水汽爬上南部复杂的地形很容易形成强烈的对流活动，因此成为雷电活动密度与强度的大值区；充沛的降水使这成为丰富的草原和森林，因此也成为农牧业活动的密集区。密集和高强度的雷电活动加上活跃的人类活动使之成为雷电灾害的高危险区。

4 讨论

在全国雷电灾害风险研究中袁湘玲等[21]提出31省市青海雷电灾害的生命易损模数很低，只有8.0人·km^{-2}，这是由于区域受到雷电灾害危害的人口数量除以各区域的行政面积得出。三江源地区玉树州、果洛州地广人稀，但在2016年后雷电灾害人口年均受灾19人，年均死亡人口达6人，如2022年雷电受灾人数32人，死亡人数达16人，人口死亡占比达50%。这是因为玉树州的治多县、囊谦县和果洛州的玛沁县、达日县、甘德县是青海三江源冬虫夏草资源生长适宜区[22]，每年会有很多外来人口来到此草原处挖虫草，行踪不定，因此造成了生命易损性的不确定性，在雷电灾害总伤亡事件中挖虫草伤亡人数占比超过47%，因此本研究在考虑雷电危险性因子中不能像其他省份地区研究中一样考虑当地人口密度和GDP密度的权重影响[2-3]。

在雷电活动灾害时间变化研究中，龚梅竹等[23]研究认为青海致灾雷电主要分布在青南牧区和东部农业区，与本文研究内容一致；但她得出致灾雷电变化总体呈下降趋势与陶世银等[24]分析青海云地闪在2008—2016年呈现逐年增加趋势则不同，本文研究三江源玉树州、果洛州雷电灾害2016年后受灾人口和死亡人数呈现明显增加，与陶世银研究相对应；蔡永祥等[17]得出青海雷电灾害分布呈东多西少、南多北少特征，青海雷电灾害呈现平稳上升趋势，与上述和本文研究有较好的吻合。

在雷电灾害空间分布研究中，李文辉等[25]将三江源玉树州和果洛州划分为雷电灾害中等风险区，雷电灾害高风险区主要位于昆仑山、祁连山、唐古拉山、巴颜喀拉山和阿尼玛卿山以及青南局部地区。本文结合地形条件得出雷电灾害与海拔高度呈负相关，但与地形起伏度和地形坡度呈正相关，

表5 雷电灾害危险性与地理因子的相关分析

Tab. 5 Correlation analysis of lightning hazard risk and geographical factors

相关性	灾害密度	地闪密度	地闪强度	雷电危险性	草原雷电危险性	森林雷电危险性
海拔高度	-0.164	-0.594**	-0.481**	-0.618**	-0.623**	-0.080
地形起伏度	0.268*	0.382**	0.345**	0.468**	0.487**	0.109
地形坡度	0.306**	0.308**	0.281**	0.413**	0.429**	0.150

注：*、**分别为通过0.05、0.01水平的显著性检验。

因此在三江源地形起伏较大的南部地区是雷电灾害高危险区，与王治邦等[26]青海雷电灾害风险区划得出玉树州囊谦县的致灾因子危险性高一致，本文研究中玉树州囊谦县的着晓乡、毛庄乡、东坝乡、娘拉乡、吉尼赛乡，还有玉树市的下拉秀镇是雷电灾害的危险性高值区。同时果洛州南部班玛县的马可河乡、赛来塘镇、知钦乡、灯塔乡、吉卡乡、亚尔堂乡、多贡麻乡、江日堂乡，久治县的哇尔依乡和玛沁县的拉加镇，东部地区甘德县的下贡麻乡和江千乡是雷电灾害的危险性高值区。

在雷电灾害与地形关系研究中，胡亚男等[27]认为地闪密度随海拔先增后减，随坡度的增大而减小；地闪强度随海拔先减后增，与坡度成正相关与本文研究有所不同，由于其针对全省范围，本研究针对三江源玉树州和果洛州，地形环境参数与全省其他地区相比差别很大。程攀等[28]分析辽宁雷电分布及其与海拔高度的关系，认为闪电密度随海拔高度升高而减小与本文研究一致，三江源地区地闪密度、地闪强度和雷电灾害危险性与与海拔高度呈极显著负相关，由于玉树州和果洛州平均海拔在4000 m左右，海拔高度的增大只会抑制对流的发展。

5 结 论

本研究通过空间网格技术对三江源玉树州、果洛州的地闪密度、地闪强度和雷电灾害密度进行空间分析，并构建三江源雷电灾害危险性模型，对三江源玉树州、果洛州草原、森林地区雷电灾害危险性进行评价，结论如下：

（1）三江源地区雷电灾害6月伤亡最严重，多集中在12:00—20:00，16:00受灾人最多，17:00雷击死亡人最多，玉树州囊谦县、杂多县、玉树市，果洛州甘德县伤亡占比高。

（2）三江源玉树州南部地闪密度高，地闪强度大，雷电灾害集中在中南部；果洛州整体地闪密度高，东部与南部地闪强度比较大，雷电灾害集中在果洛中东部。雷电灾害危险性高值分布在玉树州囊谦县的着晓乡、毛庄乡、东坝乡、娘拉乡、吉尼赛乡和玉树市的下拉秀镇；果洛州班玛县的马可河乡、赛来塘镇、知钦乡、灯塔乡、吉卡乡、亚尔堂乡、多贡麻乡、江日堂乡，甘德县的下贡麻乡和江千乡，久治县的哇尔依乡和玛沁县的拉加镇。

（3）三江源草原雷电危险性高值区集中在玉树州西部和南部，果洛州南部和中东部。森林危险性高值区集中在玉树州东南部，果洛州南部和东北部。

（4）三江源雷电灾害密度、地闪密度、地闪强度及草原和森林雷电危险性与海拔高度呈负相关，与地形起伏度和地形坡度呈正相关。除森林雷电危险性与地理因子相关性没达到显著，草原雷电危险性与地形因子呈显著、极显著相关。

参考文献（References）

[1] 刘兆旭, 刘晶, 范子昂. 2005—2020年新疆雷电灾害特征分析[J]. 干旱区地理, 2022, 45(5): 1402-1414. [Liu Zhaoxu, Liu Jing, Fan Zi'ang. Characteristics of lightnings disasters in Xinjiang from 2005 to 2020[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(5): 1402-1414.]

[2] 王秀英, 王军, 罗少辉, 等. 基于模糊隶属度的雷电危险度等级评定[J]. 干旱区地理, 2019, 42(3): 534-541. [Wang Xiuying, Wang Jun, Luo Shaohui, et al. Assessment of lightning hazard degree based on fuzzy membership[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(3): 534-541.]

[3] 高燚, 蒙小亮, 劳小青. 基于聚类分析的海南岛雷电灾害易损度风险区划[J]. 自然灾害学报, 2013, 22(1): 175-182. [Gao Yi, Meng Xiaoliang, Lao Xiaoqing. Cluster analysis-based vulnerability risk zoning of lightning disaster in Hainan Island[J]. Journal of Natural Disasters, 2013, 22(1): 175-182.]

[4] 徐金霞, 郭海燕, 代涛, 等. 四川泸州长江河谷地带雷电危险性评价[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2023, 45(2): 160-169. [Xu Jinxia, Guo Haiyan, Dai Tao, et al. Evaluation of lightning hazard in the Yangtze River Valley of Luzhou, Sichuan[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2023, 45(2): 160-169.]

[5] 李霞, 李祥超, 杨益荣, 等. 绍兴市雷电灾害风险区划分析[J]. 电瓷避雷器, 2021(6): 88-93. [Li Xia, Li Xiangchao, Yang Yirong, et al. Analysis of the risk zoning of lightning disaster at Shaoxing City[J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(6): 88-93.]

[6] 龙爽, 俞海洋, 李婷, 等. 河北省乡村雷电灾害风险区划研究[J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(11): 174-179. [Long Shuang, Yu Haiyang, Li Ting, et al. Research on lightning disasters risk zoning in the rural areas of Hebei Province[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2019, 40(11): 174-179.]

[7] 陈家宏, 冯万兴, 王海涛, 等. 雷电参数统计方法[J]. 高电压技术, 2007(10): 6-10. [Chen Jiahong, Feng Wanxing, Wang Haitao, et al. Statistical methods for lightning parameters[J]. High Voltage Technology, 2007(10): 6-10.]

[8] 张烨方, 冯真祯, 王颖波, 等. 基于GIS的网格化雷电灾害风险评估模型及其应用[J]. 气象科技, 2016, 44(1): 142-147. [Zhang Yefang, Feng Zhenzhen, Wang Yingbo, et al. GIS-based gridding risk assessment model of lightning disasters and its application[J].

Meteorological Science and Technology, 2016, 44(1): 142-147.]
[9] 陈柳彤, 龙爽, 俞海洋, 等. 河北省雷电灾害风险区划研究[J]. 灾害学, 2019, 34(3): 189-195. [Chen Liutong, Long Shuang, Yu Haiyang, et al. Research on risk zoning of lightning disaster in Hebei Provnice[J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(3): 189-195.]
[10] 田德宝, 冯瑜骅, 张雪慧, 等. 2012—2017年全国雷电灾害事故统计分析[J]. 科技通报, 2020, 36(5): 42-47. [Tian Debao, Feng Yuhua, Zhang Xuehui, et al. Statistical analysis of lightning disaster accidents in China from 2012 to 2017[J]. Bulletin of Science and Technology, 2020, 36(5): 42-47.]
[11] 刘晓东, 冯旭宇, 宋昊泽, 等. 内蒙古地区雷电活动及雷灾特征分析[J]. 灾害学, 2016, 31(1): 60-65. [Liu Xiaodong, Feng Xuyu, Song Haoze, et al. Analysis of characters of lightning activity and lightning disasters in Inner Mongolia[J]. Journal of Catastrophology, 2016, 31(1): 60-65.]
[12] 邓德文, 周筠珺, 赵鹏国, 等. 中国典型区域雷电活动气候特征及其机制分析[J]. 气象科学, 2013, 33(1): 109-118. [Deng Dewen, Zhou Junjun, Zhao Pengguo, et al. Characteristics of lightning activities over typical areas of China and analysis of the causes[J]. Journal of Meteorological Science, 2013, 33(1): 109-118.]
[13] 周筠珺, 孙凌, 杨静, 等. 中国西南及其周边地区雷电活动的特征分析[J]. 高电压技术, 2009, 35(6): 1309-1315. [Zhou Yunjun, Sun Ling, Yang Jing, et al. Characteristics of lightning activities over southwest and its circumjacent areas in China[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(6): 1309-1315.]
[14] 许永彬, 格桑次仁, 陈勇. 拉萨市城区雷电特征与防护技术[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(10): 184-190, 199. [Xu Yongbin, Gesang Ciren, Chen Yong. Lightning characteristics and protection technology of urban areas of Lhasa City[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2017, 45(10): 184-190, 199.]
[15] 多吉次仁, 德庆卓嘎, 旦增伦珠, 等. 1998—2018年西藏地区雷电灾害时空分布及灾害特征分析[J]. 高原科学研究, 2020, 4(3): 30-35. [Duoji Ciren, Deqing Zhuoga, Danzeng Lunzhu, et al. Study on the spatial-temporal distribution and characteristics of lightning hazard in Tibet during 1998—2018[J]. Plateau Science Research, 2020, 4(3): 30-35.]
[16] 赵阳, 张义军, 董万胜, 等. 青藏高原那曲地区雷电特征初步分析[J]. 地球物理学报, 2004, 47(3): 405-410. [Zhao Yang, Zhang Yijun, Dong Wansheng, et al. Preliminary analysis of characteristics in lightning the Naqu area of the Qinghai-Xizang Plateau[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2004, 47(3): 405-410.]
[17] 蔡永祥, 罗少辉, 唐文婷, 等. 1995—2020年青海省雷电灾害时空分布及其灾害特征分析[J]. 灾害学, 2022, 37(1): 92-95, 119. [Cai Yongxiang, Luo Shaohui, Tang Wenting, et al. Temporal and spatial distribution patterns of lightning hazard and its characteristics of Qinghai Province from 1995 to 2020[J]. Journal of Catastrophology, 2022, 37(1): 92-95, 119.]
[18] 刘垚, 包云轩, 缪启龙, 等. 杭州市雷电灾害风险区划及分析[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2014, 50(3): 99-105. [Liu Yao, Bao Yunxuan, Miao Qilong, et al. Risk zoning and analysis of lightning disasters in Hangzhou[J]. Journal of Northwest Normal University (Natural Science Edition), 2014, 50(3): 99-105.]
[19] 刘晓东, 冯旭宇, 刘旭洋, 等. 内蒙古雷击人员伤亡特征及其致灾因素的熵权分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(4): 182-188. [Liu Xiaodong, Feng Xuyu, Liu Xuyang, et al. Characteristics of lightning casualties in Inner Mongolia and entropy weight analysis of disaster-causing factors[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16(4): 182-188.]
[20] 殷启元, 范祥鹏, 陈绿文, 等. 广东省雷电伤亡事故特征分析[J]. 自然灾害学报, 2019, 28(6): 204-213. [Yin Qiyuan, Fan Xiang peng, Chen Lüwen, et al. Characteristic analysis of Guangdong lightning casualties[J]. Journal of Natural Disasters, 2019, 28(6): 204-213.]
[21] 袁湘玲, 周倩, 王振会, 等. 雷电灾害风险分级方法研究[J]. 灾害学, 2017, 32(1): 26-31. [Yuan Xiangling, Zhou Qian, Wang Zhenhui, et al. A study on the lightning disaster risk grading methods [J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32(1): 26-31.]
[22] 梁静, 李秀璋, 陈建博, 等. 青海省冬虫夏草资源适宜性区划分析[J]. 菌物学报, 2022, 41(11): 1772-1785. [Liang Jing, Li Xiuzhang, Chen Jianbo, et al. Suitability and regionalization of Chinese cordyceps in Qinghai Province, northwest China[J]. Mycosystema, 2022, 41(11): 1772-1785.]
[23] 龚梅竹, 刘晓燕, 达鹏奎, 等. 1998—2020年青海致灾雷电日的气象环境参数特征研究[J]. 灾害学, 2022, 37(4): 11-17. [Gong Meizhu, Liu Xiaoyan, Da Pengkui, et al. Characteristic study on environment parameters of the lightning day causing disaster in Qinghai from 1998 to 2020[J]. Journal of Catastrophology, 2022, 37(4): 11-17.]
[24] 陶世银, 蔡忠周, 王敏, 等. 青海高原2008—2016年云地闪特征分析[J]. 冰川冻土, 2018, 40(2): 288-297. [Tao Shiyin, Cai Zhongzhou, Wang Min, et al. Analysis of cloud ground flash characteristics on the Qinghai Plateau from 2008 to 2016[J]. Glacier Permafrost, 2018, 40(2): 288-297.]
[25] 李文辉, 刘鑫, 吴让, 等. 2010—2019年青海省雷电灾害综合风险区划[J]. 干旱气象, 2021, 39(6): 1017-1024. [Li Wenhui, Liu Xin, Wu Rang, et al. Comprehensive risk regionalization of lightning disaster over Qinghai Province form 2010 to 2019[J]. Journal of Arid Meteorology, 2021, 39(6): 1017-1024.]
[26] 王治邦, 蔡永祥, 罗少辉, 等. 青海省雷电灾害风险区划[J]. 陕西气象, 2021(3): 61-66. [Wang Zhibang, Cai Yongxiang, Luo Shaohui, et al. Risk zoning of lightning disasters in Qinghai Province [J]. Shaanxi Meteorology, 2021(3): 61-66.]
[27] 胡亚男, 陶世银, 龚梅竹, 等. 高原复杂地理参数对雷电活动的影响分析[J]. 干旱区地理, 2022, 45(3): 746-753. [Hu Yanan, Tao Shiyin, Gong Meizhu, et al. Influence analysis of geographic parameters on lightning in plateau[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(3): 746-753.]

[28] 程攀, 刘成瀚, 蔡冬梅, 等. 2010—2021年辽宁省雷电分布及其与海拔高度的关系[J]. 气象与环境学报, 2023, 39(4): 138-146. [Cheng Pan, Liu Chenghan, Cai Dongmei, et al. Analysis of lightning distribution and its relationship with altitude in Liaoning Province from 2010 to 2021[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2023, 39(4): 138-146.]

Assessment of lightning hazard in grasslands and forests in "Three River Source" region based on spatial grids

XIE Jie[1], DAI Qingcuo[1], MA Yufang[1], SUN Furong[1], LI Zixuan[1], LI Qianying[2]

(1. Qinghai Meteorological Service Center, Xining 810001, Qinghai, China; 2. 96742 Military Meteorological Observatory, Datong 810100, Qinghai, China)

Abstract: Lightning disasters in "Three River Source" region, Qinghai Province, China resulted in the most severe casualties in June, primarily between 12:00 and 20:00. The highest number of casualties occurred around 16:00, with the most fatalities due to lightning strikes around 17:00. The areas of Nangqen County, Zadoi County, Yushu City in the Yushu Prefecture, and gade in the Golog Prefecture experienced a higher proportion of casualties. The highest flash densities in "Three River Source" region were concentrated in the southern parts of Yushu Prefecture and Golog Prefecture, while the highest ground flash intensities were observed in the eastern and southern parts of Golog Prefecture and the southern part of Yushu Prefecture. Lightning disasters were most densely concentrated in the central and eastern areas of Golog Prefecture and the central and southern parts of Yushu Prefecture. The high-risk areas for lightning disasters were distributed across Zhaoxiao Township, Maozhuang Township, Dongba Township, Niangla Township, Jinisai Township in Nangqen County, and Xialaxiu Town in Yushu City, Yushu Prefecture, as well as Baima County, Jigzhi County, Wa'erji Township, and Laga Town in Maqen County, Golog Prefecture. The high-risk areas for grassland lightning hazards were mainly located in the western and southern parts of Yushu Prefecture, and the southern and central eastern parts of Golog Prefecture. Forest lightning risks were concentrated in the southeastern part of Yushu Prefecture and the southern and northeastern parts of Golog Prefecture. The analysis showed a negative correlation between lightning disasters and altitude, while terrain undulation and slope were positively correlated with these events. By assessing the risk of lightning disasters in the grasslands and forests of Yushu Prefecture and Golog Prefecture within the "Three River Source" region, a solid foundation is established for effective lightning disaster prevention.

Key words: "Three River Source" region; Yushu Prefecture and Golog Prefecture; grassland and forest; thunder and lightning; hazard